

〔農工研技報 218〕
〔89 ~ 97, 2016〕

模擬帯水層内に淡水レンズを再現する室内実験

石田 聡* 有田智也** 曹 英傑*** 唐 常源** 白旗克志*
土原健雄* 吉本周平*

*資源循環工学研究領域水資源工学担当

**千葉大学園芸学部

***中山大学

要 旨

淡水レンズの発生を室内で再現する実験装置を構築するため、幅2.2 m、奥行き0.8 m、高さ1.05 mの模擬帯水層を大型実験水槽内に設け、豊浦砂を充填した。同時に実験装置内の360箇所にて電気抵抗を測定するセンサーを配置し、一定時間間隔で抵抗値を自動で測定するシステムを作成した。作成した模擬帯水層を、両側の塩水貯留槽から供給される塩水で満たした後、塩水貯留槽の水位を一定に保ちながら、上部から降雨発生装置によって淡水（模擬降水）を供給した。実験中の模擬帯水層内の電気抵抗を測定した結果、模擬帯水層内の淡水域は、中心部が縁辺部に比べて厚い、下に凸のレンズ状を保ちつつ、下方に向かって徐々に拡大した。このことから本装置により淡水レンズの形成が可能であると見込まれた。測定システムで取得した模擬帯水層内の抵抗値分布は、採水によるEC測定結果と整合的であったが、データ取得率は73%と想定より低く、測定条件の見直しが必要とされた。

キーワード：淡水レンズ、実験、地下水、帯水層

I 緒 言

降水によって地表から涵養された淡水と、海から侵入する塩水の密度差と圧力バランスによって、淡水レンズと呼ばれる地下水が分布している島嶼域においては、淡水地下水を利用するため、帯水層上部の淡水域にストレーナを設けた井戸が設置されることが多い。しかしこの井戸からの過大な揚水によって井戸周辺の圧力が低下し、塩淡境界が上昇するアップコーニングと呼ばれる現象が発生し、井戸周辺の地下水が徐々に塩水化する。揚水を停止し、降水によって淡水が涵養されればアップコーニングは徐々に回復するが、揚水量が過大であった場合にはその後の降水によっても回復しないことが経験的に知られている。しかし揚水量とアップコーニングの規模の関係や、揚水停止後の降水による回復過程は明らかにされておらず、現場では井戸内の塩分濃度を定期的に測定し、一定濃度を超えたら揚水を停止し、塩分濃度が下がるのを待って再度揚水を開始するという対症療法的な管理手法が採られているのが現状である。

淡水レンズの塩水化を対象とした研究は、マーシャル諸島共和国ローラ島 (Presley, 2005, 石田ら, 2010 など)、トンガ王国リフカ島 (太平洋諸国共同体 (SPC), 2013) などで揚水による井戸等の塩水化が報告されているが、現地試験によって揚水時や揚水停止後のアップコーニングの形状変化や回復過程、回復可能な揚水量を

明らかにした研究は見られない。その理由は、アップコーニングを発生させる揚水試験はその後の地下水利用に支障を来すおそれがあるので現地で行うことが難しいことである。しかし、このような試験によるリスクは、室内実験によって回避できると考えられる。

淡水レンズを再現した実験研究例については、井内ら (2000) が幅0.9 m、高さ0.5 m、奥行き0.04 mの模擬帯水層を実験水槽内に設け、水槽上部から降水装置によって一定量の淡水を供給し、模擬帯水層の左右から過マンガン酸カリウムで着色した塩水を供給することで、淡水レンズを再現するとともに、その形状を目視により観察し、塩淡境界形状が下に凸のレンズ状となることを示した。中園ら (2008) は半径0.7 m、高さ0.8 m、中心角60°の扇形柱体の模擬帯水層を実験水槽内に設け、水槽上部から降水装置によって一定量の淡水を供給し、円周部から食用色素で着色した塩水を供給することで、淡水レンズを再現した。また、模擬帯水層の淡水域および塩水域に水平パイプを設置し、淡水域および塩水域から同時に揚水を行った場合と、淡水域のみから揚水を行なった場合について塩淡境界の変化を比較し、両者の淡塩境界面の変化は目視ではあまり違いはみられなかったが、揚水した水の電気伝導度 (EC) の経時変化より、淡水域のみから揚水した場合の方が、淡水域のECの上昇が早いことを示している。

しかしこれら既往の研究ではいずれも実験装置の規

模が小さく、帯水層内の水の塩分濃度分布を測定して、アップコーニングの発生や回復の状況を把握することは困難であった。またこのような実験研究例が少ない理由は、淡水レンズの再現には降雨発生装置や塩水供給装置などが必要となり、実験装置の作成が煩雑であること等のためと考えられる。このような背景のもと、本研究では大型水槽を使用した淡水レンズ室内実験装置を構築するとともに、装置を用いた淡水浸透実験を行い、その結果について考察した。

II 実験装置

本実験装置は、淡水レンズを形成するための模擬帯水層、模擬帯水層の側方から塩水を供給する塩水貯留槽、塩水貯留槽の水位を周期的に変化させる潮汐発生装置、模擬帯水層の上方から淡水を供給する降雨発生装置、模擬帯水層内の塩分濃度を分布的に測定する測定装置等より成る。これらは全て空調が効いた室内にある。Fig. 1に装置の概念図を、Fig. 2に装置の配管系統図を示す。

2.1 模擬帯水層

模擬帯水層、塩水貯留槽は、大型実験水槽に設置されている。大型実験水槽は幅3.2 m、高さ1.2 m、奥行き0.8 mであり、その中央部に幅2.2 m、高さ1.05 m、奥行き0.8 mの模擬帯水層を設け、その両側に幅0.5 m、高さ1.2 m、奥行き0.8 mの塩水貯留槽を設けた。模擬帯水層と塩水貯留槽とは、模擬帯水層内の砂の流出を防ぎつつ水を通過させるため、SUS金網#200 (目開0.074 mm)にSUS金網#8 (目開2.375 mm)を重ねた透水板で仕切った。塩水貯留槽内には定められた高さに越流アクリルパイプが設置され、この高さを越えた水はパイプ内に流入し、パイプに接続されたホースによって塩水貯留槽外に排出されることで、水位が一定に保たれる。また、模擬帯水層に砂を詰める際に水槽が膨らまないように四面を鉄枠で挟み込んで固定した。

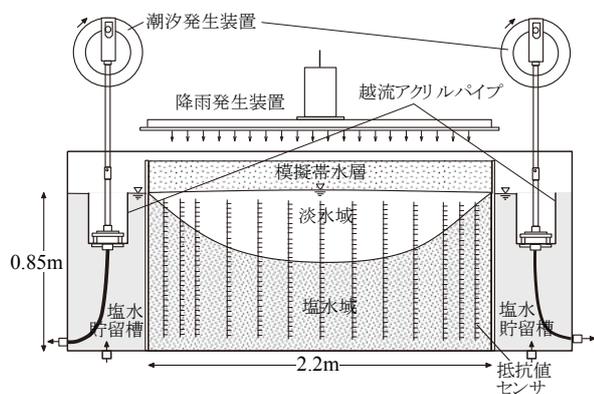


Fig. 1 実験装置概念図

Conceptual diagram of experimental device

実験中は降雨発生装置から供給される淡水が継続的に塩水貯留槽に流入してくるので、塩水の濃度低下を防止する必要がある。このため、塩水貯留槽の底部にバルブを設け、このバルブと塩水供給タンクを接続し、実験中はこのバルブから常に塩水を供給する構造とした。塩水供給タンクは容量1 m³のタンクを2個準備し、塩水供給ポンプ (三相電機製マグネットポンプPMD2573B2FおよびPMD581B2E) によって給水した。

2.2 降雨発生装置

降雨発生装置は模擬帯水層上部に、偏り無く一定量の淡水を供給するものである (Fig. 2右側)。

ここでは模擬帯水層の上面から高さ0.5 mの位置に、長さ0.9 mの降水パイプ (硬質塩ビ管VP13A, 内径13 mm) を模擬帯水層中心線から左右に5本ずつ計10本平行に固定したものを2セット (降雨パイプ小, 降雨パイプ大) 用意し、それぞれの降水パイプ下方に孔パイプ小はφ0.5 mm, 降雨パイプ大はφ1.6 mmの穴を等間隔に10箇所開け、パイプに導水した淡水をこの穴から下方に落下させる構造とした。なお、Fig. 2では降雨パイプ小は左側、降雨パイプ大は右側に記してあるが、実際には降雨パイプ小, 降雨パイプ大とも、模擬帯水層上部の両側に配されている。また、以下に記す実験は降雨パイプ小のみを用いている。

降雨発生装置への給水は、容量1,000 Lの淡水供給タンクから、降雨送水ポンプ (岩谷電機製ステンレスカスケードポンプ20CJT0401) によって行い、給水量を把握するため流量計 (アズワン流量計AI-0354-040およびAI-0354-020) を接続した。降水量の調整は、降雨送水ポンプから降雨パイプに至る配管途中に分岐を設け、淡水の一部を淡水供給タンクに戻すバルブを操作することによって行った。実験に先立って、流量計に表示される流量と、模擬帯水層に供給される降水量との関係は予め測定したところ、本装置で供給可能な降水量は20～170 mm/hであった。

2.3 潮汐発生装置

今回の試験では使用していないが、作成した装置には潮汐発生装置も含まれているので概要を記す。

潮汐の発生装置は、駆動モーター (住友重機製CNHM02-5087-AV-51) および減速ギアにより機械的に円盤を回転させ、円盤に接続させた越流アクリルパイプを上下させることにより、水位を周期的に変化させる構造とした (Fig. 2)。

振幅の調整幅は0～0.3 m, 回転数の調整幅は1～12時間/回転とした。

2.4 測定

2.4.1 抵抗値計測システム

実験中の淡水レンズの形状やアップコーニングの状態

を把握するためには、模擬帯水層内の水の塩分濃度分布を測定する必要がある。緒言で述べたように、既往の研究では塩水を着色し目視によって塩淡水境界位置を把握していたが、塩水と淡水が混合した汽水域が形成される場合、この方法では正確な塩分濃度分布の把握は難しい。井内ら（2000）は目視による確認の補足として、模擬帯水層内に多数の細孔を空けた直径3 mmのパイプを一定間隔で鉛直に立て込み、針の長い注射器でパイプ内の水を一定深度毎に採取し、ECを測定した。このパイプは模擬帯水層内のオールストレーナ井戸とみなすことができる。この方法は採水の手間は掛かるが、模擬帯水層内の塩淡水境界が動かない定常状態であれば有効な方法であると考えられる。しかし模擬帯水層内での揚水や、潮汐を模した塩水水位の変動などがある場合は、パイプが模擬帯水層内の水みちとなり、パイプ内の濃度分布は模擬帯水層内の濃度分布と異なってしまうので、模擬帯水層内の塩分濃度分布把握手法としては不適となる。このような現象は実際に淡水レンズが分布している島嶼においても確認されている（石田ら、2013）。

そこで本研究では電気抵抗を測定するセンサーを模擬帯水層内に埋め込み、一定時間間隔で自動測定を行うシステムを作成した。Fig. 3に抵抗値測定センサーの構造を示す。

1組の抵抗値センサーは長さ0.22 mのアクリル棒に等間隔にステンレス製のピンを0.03 m間隔で7本挿し、それぞれのピンにリード線が接続される構造となっている。アクリル棒とピンは接着剤で固定されている。リード線はピン毎に色分けされ、ピン毎に番号（チャンネル

ル）が割り振られ、7芯ケーブルにてリレーボックスに接続される。7芯ケーブルによってピン周辺の地下水流が乱されないように、両者の距離を約0.3 m取った。抵抗値測定センサーは4組を1列とし、Fig. 1に示すように各列鉛直に13列模擬帯水層内に埋め込んだ。各列の埋め込み位置は、模擬帯水層と塩水貯留槽の境界板を起点とし、両側の3列を0.1 m間隔、残り7列を0.2 m間隔と

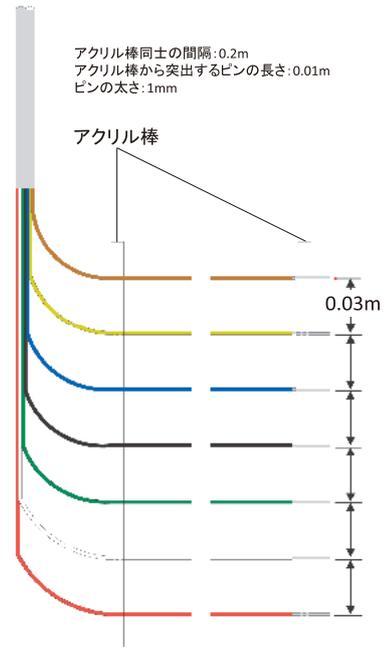


Fig. 3 抵抗値測定センサーの構造
Resistance sensors

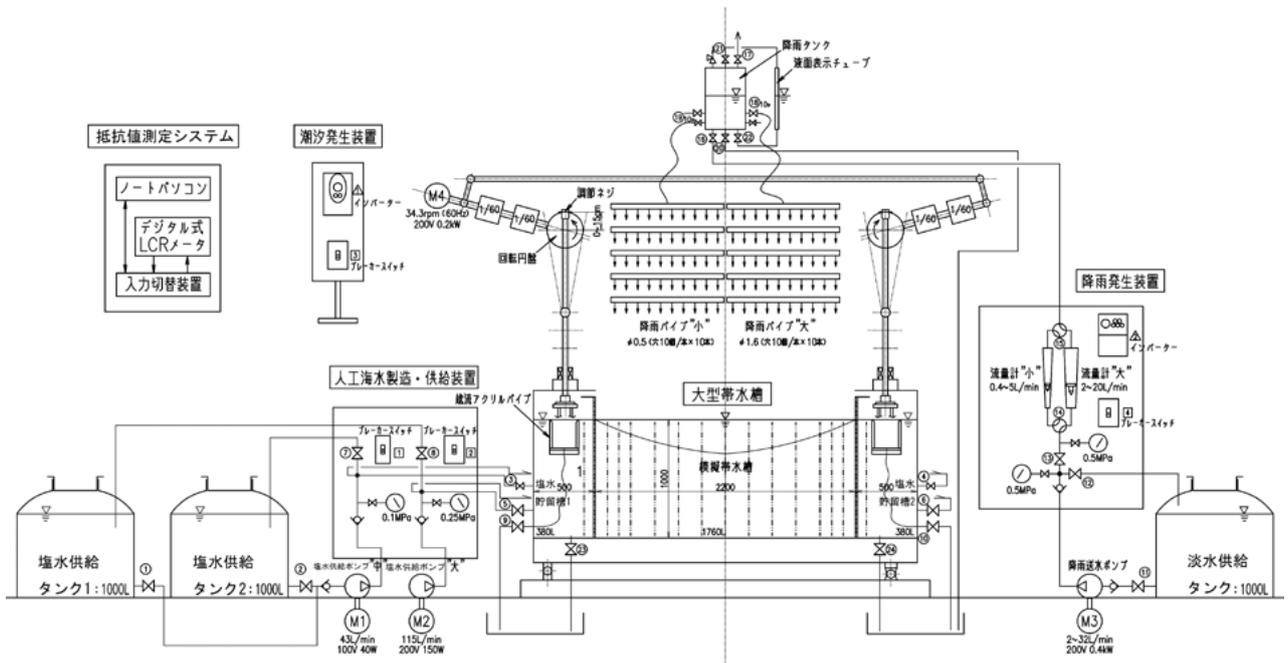


Fig. 2 実験装置配管系統図
Piping system of experimental device

した。センサーのピンの先端は支柱を塩水貯留槽に面していない側の壁から 25 cm 離れた距離に 1 列に並べセンサーの測定部が中央を向くようにした。また左右の塩水貯留槽内にもそれぞれ 1 列の抵抗値測定センサーを配した。抵抗値測定センサーの総数は 60 組で、測定箇所数は 360 点である。

模擬帯水層内の抵抗値は、抵抗値測定センサーの隣り合ったピン間の抵抗値を LCR メータ (日置電機製 3511-50, 測定周波数 1 kHz) で測定することとし、測定対象とする抵抗値測定センサーのピンを切り替えるためのリレーボックスを設け、測定対象とするチャンネル、チャンネル間のウェイトタイム、測定時間間隔等を指定してリレーボックスの動作を制御し、測定結果をパーソナルコンピュータに収録するソフトウェアを作成した。

2.4.2 EC 測定のための採水孔

抵抗値計測システムによって計測される抵抗値が、実際の模擬帯水層内の水の塩分濃度と整合的かどうかを確認するため、実験水槽の側壁 (模擬帯水層の長辺) に小孔を設け、先端にガーゼを巻いた径約 2 mm の採水チューブを水平に挿入し、実験時に模擬帯水層内から直接採水して当該地点の EC を測定できる構造とした。実験水槽の側壁から採水チューブ先端までの距離は 0.34 m である。なお、一部ではチューブによらない採水も行った (後述)。

III 測定試験

作成した測定装置の動作を確認するため、模擬帯水層を作成して淡水浸透実験を行った。

3.1 模擬帯水層

模擬帯水層の材料には粒度が揃い不純物が少ないことから実験で誤差を生じにくい標準的な砂として豊浦砂を使用した。模擬帯水層の容量は 1.848 m³ である。水槽内に豊浦砂を充填する方法は、均一かつ自然の堆積状態に近い形で充填するため、所定の高さまで水を注いだ後、砂を少しずつ加える水中落下法を用いた。また砂の高さが採水チューブ設置高付近に到達したら、順次採水チューブを挿入し、充填を進めた。実験に先立って行ったアクリルカラムを用いた定水位透水試験では、今回用いた豊浦砂の透水係数は 1.7×10^{-4} m/s であった。この値は水中落下法で供試体を作成した他の研究、(例えば山口ら (2008) による 2.26×10^{-4} m/s) と同程度のオーダーであった。

抵抗値測定センサー各列の最上部のピンの位置は底面から 0.96 m の高さ (模擬帯水層表面から 0.09 m の深さ)、最下部のピンは底面から 0.06 m の高さ (模擬帯水層表面から 0.99 m の深さ) とした。

Fig. 4 に抵抗値測定箇所および採水チューブ設置断面図を示す。採水地点のうち G-1 ~ G-4 については採水チューブを設置していない。Fig. 4 に示す抵抗値測定箇所は、抵抗値測定センサーのピンとピンの中点である。また、実験装置の構造より、模擬帯水層内の塩分濃度分布は中心線 (Fig. 4 の G 列) に対して左右対称になると考えられるので、採水チューブは中心線に対して片側のみに配した。

Table 1 に採水チューブ設置箇所の位置情報を示す。

模擬帯水層の表面には、降雨発生装置からの雨垂れで帯水層の上に窪みができるのを防ぐために、綿を敷き詰めた。

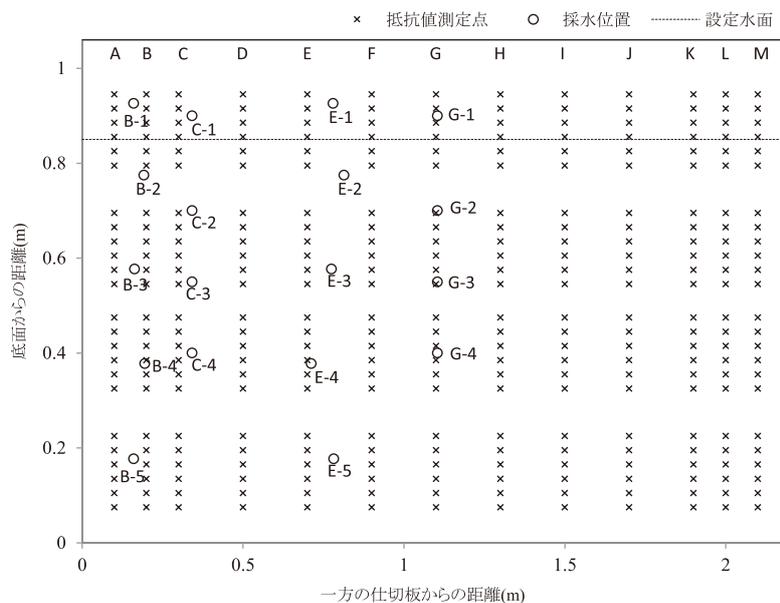


Fig. 4 抵抗値測定および採水箇所
Measurements and sampling points for resistance

Table 1 採水チューブ設置位置一覧
Locations of sampling points

	X	Y		X	Y
B-1	0.160	0.926	E-1	0.780	0.926
B-2	0.192	0.775	E-2	0.814	0.775
B-3	0.163	0.577	E-3	0.775	0.577
B-4	0.195	0.378	E-4	0.712	0.378
B-5	0.160	0.177	E-5	0.782	0.177
C-1	0.342	0.900	G-1	1.104	0.900
C-2	0.342	0.700	G-2	1.104	0.700
C-3	0.342	0.550	G-3	1.104	0.550
C-4	0.342	0.400	G-4	1.104	0.400

X：仕切板からの距離(m)，Y：底面からの高さ(m)

G-1～G-4は採水チューブなし（壁面の穴のみ）

3.2 実験条件

本研究では実験用水として、淡水には脱気水、塩水には濃度が3%となるように、精製塩を水道水に溶かしたものを使用した。塩水供給タンクに所定の水と精製塩を投入し、塩水供給ポンプにより塩水供給タンク底部の水を揚水し、揚水した水を塩水供給タンク上部に戻し循環させるという手順で攪拌を行い塩水を作成した。

本試験では、まず塩水貯留槽に塩水を導水し、水位を底面から0.85 m（以下水位0.85 mと記す）に保持した。模擬帯水層の初期状態は、このようにして塩水を十分に浸透させた状態であった。

その後降雨発生装置によって模擬帯水層上部から淡水を供給するとともに、抵抗値測定センサーによる模擬帯水層内の抵抗値測定と、採水チューブからの採水およびEC測定を一定時間間隔毎に実施した。採水地点は直前までの測定結果から塩淡水境界付近と推定される箇所とし、チューブに接続したポンプにより減圧しながら、途中に取り付けられた三方コックを開閉して行なった。

またG-1～G-4については模擬帯水層側面から直接シリンジで採水を行った。

Fig. 5に実験中の装置の状況を、**Fig. 6**に降雨発生装置による淡水の供給状況を示す。

実験諸元をまとめると以下の通りである。

塩水貯留槽水位：0.85 m

降水強度：68 mm/h

降水発生時間：4.5 h

採水時間間隔：30 min

抵抗値測定センサーデータ取得時間間隔：10 min

IV 結果

4.1 採水による模擬帯水層内のEC測定結果

Table 2に採水によって得られた模擬帯水層内の水のEC測定結果を示す。

全体的に模擬帯水層内のECが低い領域は、時間の経



Fig. 5 実験装置

Photograph of experimental device



Fig. 6 降水発生状況

Photograph of rain generator

過とともに徐々に浅層から深層に拡大している。このことは降雨発生装置によって供給された淡水が、模擬帯水層内に浸透していることを示している。模擬帯水層中央部に位置するG-1～G-4のECの変化を見ると、実験開始1.5時間後に塩水貯留槽水位より0.15 m低い位置にあるG-2のECが直前に比べて急激に低下した。このような急激なECの低下は、当該測定地点がそれまで塩水域だったが、時間の経過とともに淡水域となったことを示していると考えられる。同様に塩水槽水位より0.30 m, 0.45 m低い位置にあるG-3およびG-4では、それぞれ実験開始2.0時間後から2.5時間後、3.0時間後から3.5時間後に、ECが急激に低下した。ここでは仮に塩水と淡水の境界を両者の中間のECである2,000 mS/mと置くと、初めて淡水域に入った時間はG-2, G-3, G-4でそれぞれ実験開始から1.5時間後、2.5時間後、3.5時間後である。

これに対してG-1～G-4より0.3～0.4 mほど塩水貯留槽に近いE-1～E-5の中で、塩水貯留槽水位よりそれぞれ0.075 m, 0.273 m低い位置にあるE-2, E-3では、初めて淡水域に入った時間はそれぞれ実験開始から2.0時間後、4.0時間後と、G-2, G-3に比べて遅かった。また塩

水貯留槽水位より0.473 m低い位置にあるE-4には、実験期間中ECは低下しなかった。

G-1～G-4より0.76 m塩水貯留槽に近いC-1～C-4の傾向もE-1～E-5と同様であったが、ECが変化している時間帯においてC-2とE-2、C-3とE-3のECを比較すると、いずれも塩水貯留槽に近いC-2、C-3のECがより高い傾向にあった。

今回の採水箇所でも最も塩水貯留槽に近いB-1～B-5の中で、塩水貯留槽水位よりそれぞれ0.075 m、0.273 m低い位置にあるB-2、B-3では、初めて淡水域に入った時間はそれぞれ実験開始から2.0時間後、4.5時間後であり、後者はC-3、E-3に比べて遅く、前者は同じ時間（2.0時間後）におけるECがC-2、E-2より高かった。

4.2 模擬帯水層内の抵抗変化

抵抗値測定センサーによる測定では、総測定数4,536回のうちデータが得られたのは3,326回であり、データ取得率は73%であった。

電気抵抗は概ね $1 \times 10^3 \Omega \sim 1 \times 10^5 \Omega$ のオーダーの範囲内であった。全箇所での平均値は実験開始時に $8.8 \times 10^2 \Omega$ であったものが、実験終了時には $2.3 \times 10^6 \Omega$ となった。比較的浅い位置の測定箇所では、実験中にそれまで $1 \times 10^3 \Omega$ のオーダーであった抵抗値が、10分後の測定では $1 \times 10^5 \Omega$ のオーダーに増加する現象が見られ、これが塩水域から淡水域への移行を捉えていると考えられ

Table 2 EC測定結果
Results of EC measurements

時間	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30
B-1	4410	136	38.9	33.4	33.2	-	-	-	-
B-2	-	4560	4500	1590	78	52.2	41	43.4	33.8
B-3	-	-	-	-	-	-	4560	4150	289
B-4	-	-	-	4420	4420	4460	4480	4470	×
B-5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C-1	4440	181	60.4	43.6	36	31.9	-	-	-
C-2	4460	4460	4460	816	54.9	38.5	36.5	-	-
C-3	-	-	-	4420	4550	4500	4490	1402	117.6
C-4	-	-	-	-	-	-	-	4480	4460
E-1	4510	40.7	31.8	29.6	-	-	-	-	-
E-2	-	4480	3730	58.9	42.4	37.8	41.7	34	31.5
E-3	-	-	4510	4470	4490	4480	3740	112.4	56.4
E-4	-	-	-	-	-	-	4540	4480	4530
E-5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G-1	4300	175.4	31.3	27.7	26.8	-	-	-	-
G-2	4270	4300	239	37.8	29.1	28.9	-	-	-
G-3	-	-	4380	4390	1043	77.5	43.8	40.6	37.3
G-4	-	-	-	-	4540	4020	469	59.8	42.6

単位 (mS/m, 25℃換算), 時間: 実験開始からの経過時間
 - : 測定せず (他のデータより類推可能), × : 測定ミス
 着色 : 2,000mS/m未満

る。

Table 3に取得したデータのうち、測定箇所が塩水域から淡水域に移行するときの測定値の変化の例を示す。

抵抗値測定センサーで得られるデータは10分毎の360点の抵抗値であり、膨大な生データを掲載することは誌面の都合上難しい。ここでは模擬帯水層の中心線から、採水によってECを測定した側のそれぞれの測定箇所において、実験開始から抵抗値が $1 \times 10^5 \Omega$ を超えるまでの経過時間をTable 4に示す。

塩水貯留槽の水位より下方のセンサーにおける実験

Table 3 抵抗値の変化例
Example of change in resistance

時間	3:10	3:20	3:30	3:40	3:50	4:00
A (69.5)	4.23E+05	3.83E+05	3.60E+05	3.49E+05	3.49E+05	3.46E+05
A (66.5)	5.55E+04	8.87E+04	1.55E+05	2.21E+05	2.31E+05	2.24E+05
A (63.5)	4.50E+03	9.00E+03	2.87E+04	9.09E+04	1.96E+05	1.84E+05
A (60.5)	2.83E+03	1.95E+03	4.16E+03	1.70E+04	6.07E+04	9.66E+04
A (57.5)	3.77E+03	1.99E+03	1.94E+03	2.82E+03	1.03E+04	5.14E+04

単位: Ω , 着色: $1.0 \times 10^5 \Omega$ を超える測定値, () はセンサー高さ(cm)

Table 4 抵抗値が $1 \times 10^5 \Omega$ を超えるまでの経過時間
Times when resistance conspicuously increased

センサ高(m)	A列	B列	C列	D列	E列	F列	G列
0.945	1:00	1:00	0:40	1:30	0:50		
0.915	1:10	1:10	0:50	1:30	1:00	1:00	0:50
0.885	1:20	1:10	1:20	1:30	1:20	1:10	1:00
0.855	1:20	1:40	1:20	1:40	1:30		1:10
0.825	1:20	1:40	1:40	1:50	1:50	1:30	1:10
0.795	2:00	1:50	2:00	2:00	2:00	1:40	1:40
0.695	3:00	3:10	2:30	2:20	3:00	2:40	2:10
0.665	3:30	3:10	2:40	2:40	3:10	3:00	2:20
0.635	3:50	3:30	2:50	2:50	3:30	3:10	
0.605	4:10	3:40	3:20	3:30	3:40	3:40	
0.575	-	3:50	3:50	4:00	3:50	3:50	3:30
0.545	-	-	4:10	4:20	4:10	4:10	3:40
0.475	-	-	-	-	-	-	-
0.445	-	-	-	-	-	-	-
0.415	-	-	-	-	-	-	-
0.385	-	-	-	-	-	-	-
0.355	-	-	-	-	-	-	-
0.325	-	-	-	-	-	-	-
0.225	-	-	-	-	-	-	-
0.195	-	-	-	-	-	-	-
0.165	-	-	-	-	-	-	-
0.135	-	-	-	-	-	-	-
0.105	-	-	-	-	-	-	-
0.075	-	-	-	-	-	-	-

実験開始からの経過時間, センサ高は模擬帯水層底面が起点
 - : 顕著な増加なし, 空欄: 欠測により判別不能

開始から抵抗値が顕著に増加する時間は、全体的にはセンサーの位置が高いほど、またセンサーの位置が模擬帯水層の中心に近いほど短くなる傾向にあったが、B列の0.795 mセンサー、C・D列の0.795～0.635 mセンサーなど、この傾向に従わない箇所も見られた。

実験終了までに抵抗値が $1 \times 10^5 \Omega$ を超えたセンサーの下限高さは、C～G列が0.545 mであったのに対し、B列が0.575 m、A列が0.605 mと、塩水貯留槽に近づくほど高かった。

V 考 察

5.1 模擬帯水層内の塩分濃度分布測定手法について

実験終了時のEC低下域および抵抗値増加域について、Table 2とTable 4を比較すると、B列では下限がそれぞれB-3（高さ0.577 m）とセンサー高0.575 m、C列ではC-3（高さ0.55 m）とセンサー高0.545 m、E列ではE-3（高さ0.577 m）とセンサー高0.545 mとほぼ一致しており、塩水域と淡水域の識別はどちらの手法でも可能であると考えられる。しかしG列ではG-4（高さ0.4 m）とセンサー高0.545 mがそれぞれの下限となっており、0.145 mの差が見られる。この原因として、G-1～G-4には採水チューブを設置しなかったことが考えられる。採水チューブを用いた場合、採水地点は壁面から0.34 m離れた地点となるが、G-1～G-4は壁面に近い箇所からの採水となり、模擬帯水層の中心部とは塩分濃度の分布が若干異なっていた可能性がある。これらの結果より、採水によるEC測定では採水箇所を模擬帯水層の壁面から離す必要がある。

一方、抵抗値測定センサーによる測定は、大量のデータを自動取得することができるため、模擬帯水層内の抵抗値分布を子細に把握することが可能であることが示された。しかし同時に、欠測が多いという問題点も明らかになった。欠測時の動作を確認すると、リレーが切り替わりLCRメータが測定を開始したときに、LCRメータの測定レンジの切り替えが上手くいかないことが多く、特に直前の測定点から抵抗値が大きく変わる点を測定した場合この傾向が顕著であった。この現象は、1地点あたりの測定時間（ウェイトタイム）を長く取ればある程度回避できるが、そうすると1回の測定点数を少なくするか、測定間隔を長く取る必要がある。今回の実験でも、センサーの高さが0.4 m以下の領域は常に塩水であったことから、実験結果を予測して測定するセンサーを選別し、欠測を少なくすることも検討する必要があると考えられる。

5.2 淡水レンズの再現性について

Table 4より、実験中の淡水域を $1 \times 10^5 \Omega$ 以上の部分と定義すると、模擬帯水層中心部が縁辺部（塩水貯留槽付近）に比べて厚い形状を保ちつつ、下方に向かって

徐々に拡大したと言える。このことから、本実験装置による模擬帯水層内での淡水レンズを再現することは可能であると考えられる。今回の実験では、模擬帯水層内の抵抗値やECが時々刻々変化する様子をセンサーや採水による測定で捉える事が可能かどうかを判断するため、降水量を大きめに設定したので定常状態には達しなかった。しかし降水量をより小さく設定すれば、塩淡境界の変動がなくなり、淡水域はレンズ状を保ち続けると予想される。

ここでは井内ら（2000）を参考に、模擬帯水層内に淡水レンズを定常状態で発生させるために必要な降水量を明らかにするため、淡水と塩水の混合がないと仮定し、地下水の圧力を静水圧近似するDupuit近似を用いて、降水量と塩淡境界深度との関係を求める。解析領域はFig. 7に示す均質・等方媒体の不圧帯水層である。

左右の海面高をH、塩淡境界面高を ζ 、地下水位を η 、帯水層の透水係数をK、単位面積当たりの降水量をNとすると、Dupuit近似における定常状態の基礎方程式は次式のとおりである。

$$K(\partial^2 \eta^* / \partial x^2) = -N^* \quad (1)$$

ここで、

$$\eta^* = (\eta - H)^2 / 2(\gamma H)^2 \quad (2)$$

$$N^* = (\rho_f / \rho_s)(N / \gamma H^2) \quad (3)$$

となる。 ρ_f 、 ρ_s はそれぞれ淡水、塩水の密度、 $\gamma = (\rho_s - \rho_f) / \rho_f$ である。

両海側端においてはともに $\eta = H$ なので、 $x = 0$ 、 $x = L$ でともに、

$$\eta^* = 0 \quad (4)$$

が成立する。式(1)は η^* について厳密解が得られ、

$$\eta^* = -(N^* / 2K)(x^2 - Lx) \quad (5)$$

となる。式(2)より帯水層底面から地下水面までの高さ

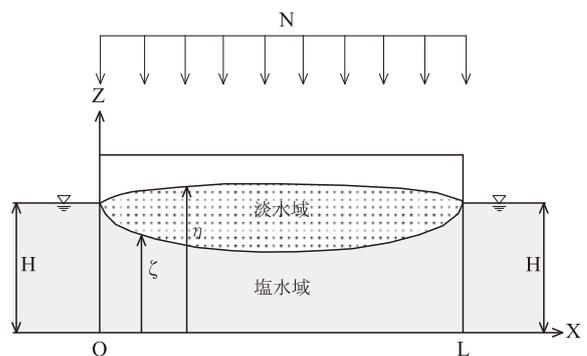


Fig. 7 淡水レンズ解析領域（井内ら（2000）に加筆）
Schematic of freshwater lens (retouched with Inouchi et al. (2000))

η は、

$$\eta = \gamma H(2\eta^*)^{1/2} + H \quad (6)$$

と求められる。地下水流に関して Dupuit 近似を用いると、淡水の圧力 $P_f = \rho_f g(\eta - z)$ と塩水の圧力 $P_s = \rho_s g(\eta - z)$ は塩淡水境界面 $z = \zeta$ において $P_f = P_s$ となるから塩水層の厚さ ζ は、

$$\zeta = \eta - \rho_s \rho_f (\eta - H) / \gamma \quad (7)$$

と求められる。

ここで(5), (6), (7) 式に今回の実験条件, $H = 0.85$ m, $L = 2.2$ m, $\rho_f = 1.00$ g/cm³, $\rho_s = 1.03$ g/cm³, $N = 1.89 \times 10^{-2}$ mm/s, $K = 1.7 \times 10^{-4}$ m/s を与え、模擬帯水層中央部 $x = 1.1$ m における ζ を求めると負の値となる。これは降水強度が大きいため、定常状態では実験水槽内の中央部は淡水で満たされることを意味している。

一方、降水強度を今回の実験の 1/10 まで減じると、 $x = 1.1$ m における ζ が正の値 (0.15 m) となるので、定常状態で淡水域をレンズ状に保つためには降水強度を今回の実験より 1 オーダー小さくできる降雨発生装置が必要である。

今回の実験の結果を受け、降雨発生装置による降水強度をより小さく設定することを試みたが、降雨発生装置に供給する水量を絞ると、降水パイプ内が満流ではなくなり、パイプの位置によって降水量にむらが出てしまうため、実現できなかった。このため、パイプに空ける穴をより小さくするか、パイプの径を小さくする等の改良が必要である。

VI 結 言

本研究では、大型水槽内の模擬帯水層を中心とした淡水レンズ再現装置、および模擬帯水層内の抵抗値分布を自動で測定するシステムを構築し、装置の動作状況を確認するため、淡水浸透実験を行った。

実験の結果、抵抗値測定システムによって測定した模擬帯水層内の抵抗値分布は、採水チューブを用いて測定した模擬帯水層内の EC 分布と整合的であった。一方で抵抗値のデータ取得率は 73% に留まり、その向上のためには現状の測定点数 360 点を減少させるか、実験では 10 分に設定した測定時間間隔をより長く取る必要があ

ることが明らかになった。

実験中の測定より、模擬帯水層内の淡水域は、中心部が縁辺部に比べて厚い、下に凸のレンズ状を保ちつつ、下方に向かって徐々に拡大する様子を把握することができ、本実験装置によって模擬帯水層内の塩分濃度分布を把握できることが明らかになった。

また、Dupuit 近似を用いた計算より、今回の実験条件より降雨強度を 1/10 程度小さく設定できれば、定常状態の淡水レンズを維持することが可能であると見込まれるとともに、本実験装置により揚水によるアップコーニングの発生と回復過程を明らかにするためには、降雨発生装置の改良が必要であることが示唆された。

謝辞: 本研究の一部は科研費 (15K07659) および農林水産省委託プロジェクト研究「極端現象の増加に係る農業水資源、土地資源及び森林の脆弱性の影響評価」の支援を受けて実施した。

引用文献

- 井内国光, 坂本光, 柿沼忠男 (2000): 砂モデル実験による海岸及び島しょ地下水の定常挙動, 陸水学雑誌, **61**, 1-10
- 石田 聡, 吉本周平, 小林 勤, 幸田和久, 土原健雄, 万福裕造 (2010): マーシャル諸島共和国マジュロ環礁における地下水の塩水化について, 地盤工学会誌, **58**(5), 1-4
- 石田 聡, 吉本周平, 白旗克志, 土原健雄, 今泉眞之 (2013): 深度別電気伝導度連続測定による淡水レンズ動態把握手法, 農工研技報, **214**, 163-173
- 中園知伸, 神野健二, 百田博宣 (2008): 室内実験による淡水レンズ取水工法に関する基礎的研究, 日本地下水学会講演会講演要旨, **2008**, 254-257
- Presley K. T. (2005): Effects of the 1998 Drought on the Freshwater Lens in the Laura Area, Majuro Atoll, Republic of the Marshall Islands, U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5098, 1-40
- Secretariat of the Pacific Community (SPC) (2013): Assessing Vulnerability and Adaptation to Sea-Level Rise Lifuka Island, Ha'apai, Tonga, Rising Oceans, Changing Lives Final Report, 21-22
- 山口 晶, 吉田 望, 飛田善雄 (2008): 再液化化メカニズムに関する実験的研究, 日本地盤工学会論文集, **8**(3), 46-62

Laboratory Experiment for Reproducing Freshwater Lens in Artificial Aquifers

ISHIDA Satoshi*, ARITA Tomoya**, CAO Yingjie***, TANG Changyuan**,
SHIRAHATA Katsushi*, TSUCHIHARA Takeo* and YOSHIMOTO Shuhei*

*Renewable Resources Engineering Division, Water Resources Engineering

**Chiba University

***Sun Yat-sen University

Abstract

An artificial aquifer of 2.2 m width, 0.8 m depth and 1.05 m height filled with Toyoura sand was installed in a large-scale experiment aquarium to build an experimental device that reproduces freshwater lens in the laboratory. A sensor that measured electrical resistance at 360 points in the experimental device was attached, and a system to measure resistance automatically at predetermined time intervals was concurrently constructed. The artificial aquifer was filled with saltwater supplied by tanks of saltwater on both sides. Afterwards, freshwater (simulated rainfall) was added from the upper part while keeping the water level of the saltwater tank constant. Measured electrical resistance of the artificial aquifer indicated that the freshwater area in the central part was thicker than the one at the edge and that it formed a convex lens boundary below it. The size of the freshwater area expanded during the experiment. This result shows that freshwater lens can be reproduced with this device. The resistance distribution in the artificial aquifer acquired in the system corresponded to EC measurements of the water. The rate of data acquisition for the system was 73%. This rate is lower than expected, so the measurement conditions must be modified.

Key words: *Freshwater lens, Experiment, Groundwater, Aquifer*

